干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.03.05

流域水热条件和植被状况对青海湖水位的影响①

李晓东[1,2,3]，赵慧芳[2,3]，汪关信[1]，姚凯荣[4]，辛　琼[5]，何灼伦[6]，李　林[1,2,3]

（1 兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州 731000；2 青海省气象科学研究所，青海 西宁 810001；3 青海省防灾减灾重点实验室，青海 西宁 810001；4 贵州省遵义市习水县气象局，贵州 习水 564600；5 青海省贵德县气象局，青海 贵德 811700；6 青海省水文水资源勘测局，青海 西宁 810001）

摘　要： 湖泊是陆地水资源的重要组成部分，也是局地气候和全球环境变化的敏感指示器之一。湖泊面积增加和水位的变化直接反映了流域内水量平衡变化过程，对区域和全球的气候变化的反映较为敏感。利用线性趋势法对青海湖流域长时间序列气象、水文资料以及流域水热条件和植被生长状况进行分析研究，利用皮尔逊相关系数法计算了各因素与湖水位的相关关系，旨在定量评估区域气象、水文、植被等要素的变化对和湖泊水位变化过程的贡献，开展细致的青海湖水位变化特征的影响因子探讨与分析。结果表明：该流域气候呈现显著的暖湿化趋势，其中流域年降水量总体上呈现弱的增加态势，气候倾向率为 10.8 mm·(10 a)$^{-1}$；流域年平均气温呈显著的升高趋势（$P<0.01$）。流域年可能蒸散率和年实际蒸散波动较大，年实际蒸散虽有波动但增加趋势非常明显（$P<0.01$）。流域净第一性生产力（*NPP*）平均值为 2.86 t DM·hm^{-2}·a^{-1}，呈现显著的增加趋势（$P<0.01$）。从 1961 年开始湖水位呈现逐年波动下降的趋势，到 2004 年水位最低（$P<0.01$）；2004—2015 年的近 10 a 连续上升，上升速率达 14.4 m·(10 a)$^{-1}$（$P<0.01$）。流域气温升高、降水量增加，流域气候呈显著的暖湿化特征，入湖河流径流量也呈现出弱的增加态势；气候暖湿化特征导致流域生物温度增加，植被生长状况得到改善，*NPP* 显著增加。年降水量增多，河流径流量增大，湖水位抬升；前一年的降水量、≥0 ℃积温、温度、径流量、*NPP* 和蒸发量对湖水位的影响更大；*NDVI* 和 *NPP* 的增加反映流域植被生长状况得到好转，从而增加了流域植被水土保持和水源涵养能力，对湖水位产生间接的影响。降水量、≥0 ℃积温、温度、径流量和 *NPP* 对青海湖水位起到正反馈效应，而蒸发量对湖水位主要起负反馈效应，年降水量和年径流量是湖水位变化的最直接的影响因子。

关 键 词： 青海湖流域；气候变化；水热条件；植被状况；水位

文章编号： 1000-6060(2019)03-0499-10(0499~0508)

全球变暖的问题越来越受到国内外学者的广泛关注[1]。气候变暖正在对全球自然、经济和社会造成较为严重的影响[2]，但不同地区对全球气候变化的响应不尽相同[3]。当前，全球变化研究关注的重点之一是陆地生态系统的动态变化及其对全球变化的反馈效应，气候变化对陆地生态系统造成的正面和负面的影响以及相互作用是长期以来国内外学者们关注的重点内容[4-5]。青海湖整体封闭没有出水口，又地处生态系统比较脆弱和敏感的青藏高原腹地，湖水位和水体面积极易受到该区域的长期和短期的水热条件、植被生长状况以及人类活动的干扰。位于青藏高原东北部的青海湖对全球变化异常敏感，受到青藏高原季风、西风环流和亚洲季风的共同作用区域气候特征独特[6]。青海湖地处青藏高原腹地且整体封闭没有出水口，加之独特的气候特征等优势，是进行气候变化影响及反馈、水量平衡以及

① **收稿日期：** 2018-10-15；　**修订日期：** 2019-02-15
基金项目： 青海省农牧厅支农专项及青海省科技厅重大专项（2015-SF-A4-1）；青海省科技计划项目（2017-HZ-801）；中国气象局成都高原气象研究所高原气象开放实验室基金课题项目（LPM2014004）共同资助
作者简介： 李晓东（1985-），男，青海贵德人，硕士研究生，主要从事生态环境和气候变化研究. E-mail：lixd16@lzu.edu.cn
通讯作者： 赵慧芳（1986-），女，青海西宁人，学士，主要从事生态环境和遥感应用研究. E-mail：zhaohuifang.china@163.com

与气候相互作用的理想的研究场所[7-8]。水位作为湖泊重要的水文要素之一,在反映湖泊水量变化,指示湖泊湿地生态环境状况等方面都有重要的生态意义[5,8-10]。在过去的几十年,受到气候变化的负作用影响,青海湖流域内主要的入湖河流近一半已经干枯[5],从1959年开始水位也从3 196.55 m下降到2012年的3 194.26 m,下降了近2.3 m[11],上述入湖河流干涸、水位下降等变化直接导致了湖面积的缩减,湖面水体也因此开始分离并出现了大小不一的附属湖泊。另外,伴随着湖水面积缩小和水位下降出现了譬如草地退化、水资源短缺、流域荒漠化程度加剧以及土壤侵蚀严重等一些了的环境问题[12-13]。针对上述这一系列的环境问题,越来越多的学者前后利用不同的技术手段开展了包括水位变化、水量平衡、荒漠化以及其他各个方面的研究[14-17],针对湖泊水域面积的变化也有部分学者利用3S技术开展了相关的研究工作[18-22,11]。然而,这些研究集中在湖泊水域面积动态、流域荒漠化、湖岸形态变化过程及流域生态、气候和环境演变等过程的定性研究方面,对于青海湖流域水热变化过程和植被生长特征,以及定量评估湖水位动态变化影响因素的研究相对较少。

基于上述关于青海湖流域资源环境和水文动态变化过程等方面的研究基础,开展流域水热条件、植被生长特征的研究和定量评估水位变化的影响因素等工作至关重要,不仅可以揭示流域气候变化特征和湖泊的响应特征,而且可以探索区域生态环境变化及其对区域和全球气候变化和响应特征。因此,本文通过采用青海湖流域内1961—2015年的长时间序列的气象资料、水文资料以及*NDVI*、*NPP*等数据,分析研究了青海湖流域气候变化和植被生长(*NDVI*和*NPP*)特征、湖水位变化的趋势,计算并定量评估引起水位变化的主要因子之间的关系,就影响青海湖水位变化的因素进行细致的探讨,为青海湖流域的生态环境和水资源保护与利用提供参考依据和科技支撑。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

青海湖位于青藏高原东北部边缘地区,气候特征主要以高原半干旱高寒气候为主,流域面积达29 610 km^2,整个流域地势呈现西北高东南低的特征。1961—2015年流域多年平均气温为-0.53 ℃,流域气温呈现南高北低的空间分布特征;同期流域降水量多年平均值为369.6 mm,年降水量较高的地区在湖周边山区可达到400 mm,流域内测得的平均蒸发量约为800~1 100 mm。降水量和蒸发量年内分配不均,年际变化相对较小。流域内大大小小的入湖河流有近40条,以较大入湖河流水文站测定获得的流量计算,进入湖滨地区和湖泊的多年平均地表水资源量大约达到14.57×10^8 m^3,其中较大的5条河流布哈河、沙柳河、哈尔盖河、乌哈阿兰河及黑马河的径流量占入湖地表径流量的83%;整个青海湖流域地下水资源量为7.8×10^8 m^3,大气降水和少量冰雪融水是流域河流水资源的主要补给源[11]。青海湖流域、气象站点及水文站点位置信息见图1。

1.2 数据

气象要素包括1961—2015年流域内气象站点(刚察和天峻)的日平均气温、日降水量数据。水文资料主要包含1961—2015年布哈河和沙柳河两条河流各月径流量监测数据和同期下社站监测的月湖水位数据。文中所使用的气象数据由青海省气象局气象信息中心提供,水文数据由青海省水文水资源勘测局提供。通过利用1961—2015年的日气象数据和月水文数据,计算获得了青海湖流域年平均气温、年降水量、年径流量和水位变化序列以及其他气候因子指标,针对气候因子指标和*NDVI*、*NPP*均采用天峻和刚察两个站点的平均值来代表流域的平均状况;采用利皮尔逊相关关系法分析不同要素之间的相关关系,其中年蒸发量采用彭曼公式[23](Penman-monteith公式)计算获得。利用Mann-Kendall法检验降水量长时间序列的突变变化特征。文中数据均采用Origin2017作图,用SPSS软件对数据进行统计检验和分析。*NDVI*数据采用2000—2015年EOS/MODIS 250 m分辨率的6~8月的数据进行植被变化分析。

1.3 方法

1.3.1 气候因子指标 影响流域生态系统变化的自然和气候等因素较多,一方面温度和降水决定了不同生态系统的空间分布特征;另一方面,生态系统中的水热过程,如蒸散、分解和光合作用受气候变化的影响而改变,结合降水量的变化不稳定特征和二氧化碳浓度的增加导致的“温室效应”使水热条件进一步发生更为复杂的变化,最终对生态系统的发

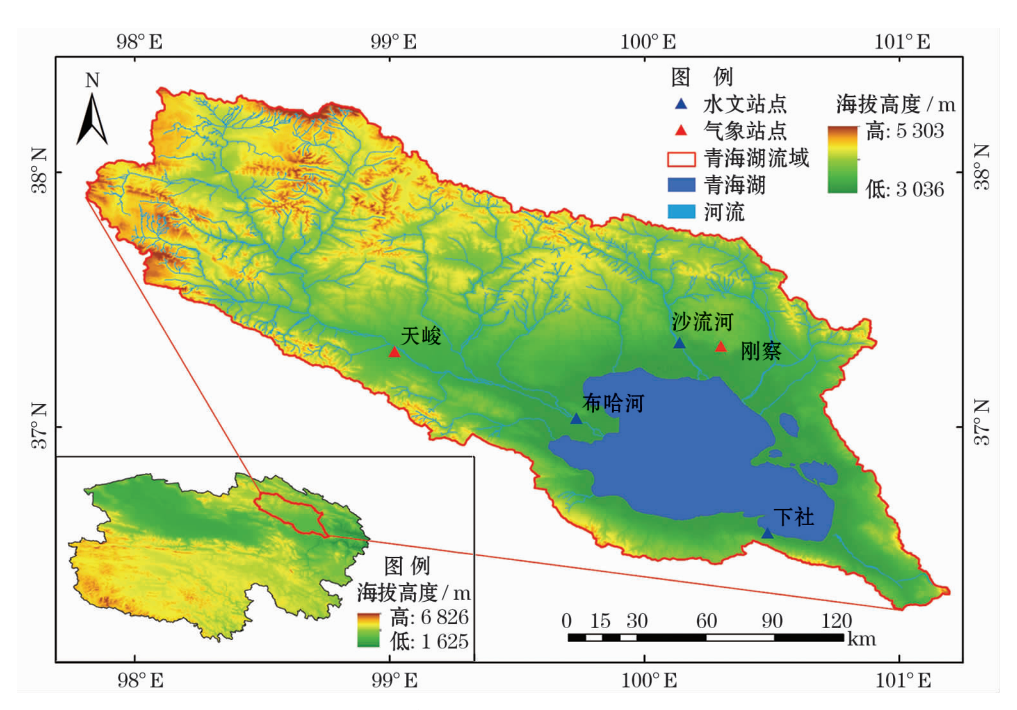


图 1　青海湖流域及气象水文站点位置图

Fig. 1　Location and drainage basin sketch map of Qinghai Lake

展和演变等过程造成影响。

1.3.2　年平均生物温度　在 0～30 ℃之间,出现植物营养生长范围的平均温度称之为生物温度[24](Biological Temperature, *BT*),公式为:

$$BT = \sum T/12 \text{ 或 }, BT = \sum t/365 \quad (1)$$

式中:年平均生物温度用 *BT* 表示; 0～30 ℃的日平均温度用 t 表示;月平均温度用 T 表示。

1.3.3　年可能蒸散和年可能蒸散率　植物高度一致且全面遮盖地表的矮小植物群体在不亏缺水分的情况下单位时间内的蒸腾量称之为可能蒸散[24](Potential Evapotranspiration, *PET*)。可能蒸散率(Potential Evapotranspiration Rate, *PER*)是指年可能蒸散和年降水量的比值,可用来评价植被生态系统的干燥度或者干燥指数等。可能蒸散和可能蒸散率的计算可利用 Holdridge 方法[24],计算公式为:

$$PEI = BT \times 58.9 \quad (2)$$

$$PER = PET/P = BT \times 58.93/F \quad (3)$$

式中:*BT* 为年平均生物温度,由公式(1)计算获得;年降水量用 P 表示。

1.3.4　净第一生产力(*NPP*)　根据周广胜和张新时[25]建立的模型来计算自然植被的净第一生产力($\text{t DM} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),计算公式为:

$$NPP = RDI^2 \times \frac{P \times (1 + RDI + RDI^2)}{(1 + RDI)(1 + RDI^2)} \times$$
$$\text{EXP}(-1\sqrt{9.87 + 6.25RDI}) \quad (4)$$

$$RDI = (0.629 + 0.237PER - 0.0031PER^2)^2 \quad (5)$$

式中:P 为年降水量,*PER* 为公式 3 计算得来的年可能蒸散率,*RDI* 为辐射干燥度。

1.3.5　年实际蒸散　根据周广胜建立的区域实际蒸散模型[26],计算公式为:

$$E = \frac{P \times R_n (P^2 + R_n^2 + P \times R_n)}{(P + R_n) \times (P^2 + R_n^2)} \quad (6)$$

式中:年降水量用 P 表示,净辐射用 R_n 表示,且

$$R_n = (PET \times P)^{\frac{1}{2}} [0.369 + 0.598 (PET/P)^{\frac{1}{2}}] \quad (7)$$

1.3.6　年湿润度指标(K)　利用年降水量 P 和≥0 ℃积温 $\sum T$ 之比可以划分草原类型的湿润度 K 指标[27],计算公式为:

$$K = \frac{P}{0.1 \sum T} \quad (8)$$

2　结果分析

2.1　青海湖流域气候因子变化情况

2.1.1　年平均气温和年降水量　从近 55 a(1961—2015 年)青海湖流域的年降水量年际变化特征可以

看出，流域年降水量呈现弱的波动增加趋势（$P>0.05$），增加的幅度达到 10.8 mm·(10 a)$^{-1}$（图 2）；从 2001 年开始，年降水量增加趋势显著；年降水量从 2001 年的 283.5 mm 增加到了 2015 年的 398.5 mm，气候倾向率达 55.5 mm·(10 a)$^{-1}$，增加的幅度远远超过了前期（1961－2000 年）。年降水量极端丰值年份发生在 1967 年和 1989 年，年降水量达 519.2 mm 和 511.2 mm。

青海湖流域近 55 a 年平均气温增温趋势显著（$P<0.01$）（图 2），气候倾向率达 0.37 ℃·(10 a)$^{-1}$。从 2001 年开始，增加的幅度明显高于 20 世纪 60 年代、70 年代、80 年代及 90 年代（$P<0.01$），近 15 a 增加了 0.64 ℃。

2.1.2 其他水热因子的年际变化 通过分析青海湖流域≥0 ℃积温和年平均生物温度可以看出（图 3），青海湖流域 1961—2015 年≥0 ℃积温和年平均生物温度具有明显的年际波动且呈现显著的升高趋势（$P<0.01$），年平均气温最高的 2013 年有效积温和年平均生物温度均达到最大，分别为 1 650.1 ℃和 4.34 ℃。流域年湿润度从 1961—2015 年具有较明显的年际波动（图 4），近 55 a 青海湖流域湿润度呈波动态势且变化相对平稳，其中从 70 年代末到 80 年代末增加幅度最大，从 1978 年的 1.54 增加到了 1989 年的 4.23。在年降水量的极端丰值年份 1967 年和 1989 年，青海湖流域的年湿润度明显高于其他年份，分别达到 4.42 和 4.23；而年降水量的极端低值年份 1978 年和 2000 年，年湿润度仅为 1.54 和 1.75。气候变化背景下，青海湖流域的气温升高，而气温的升高会对区域生态系统的年湿润度产生影响。伴随着降水量的增加，湿润度也表现出

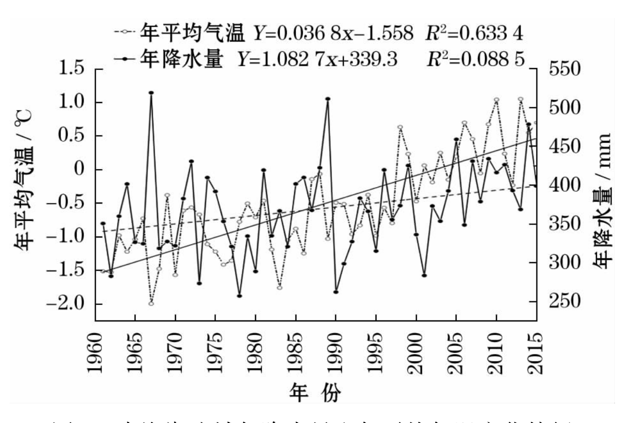


图 2 青海湖流域年降水量和年平均气温变化特征

Fig. 2 Variation of annual precipitation and mean air temperature around Qinghai Lake

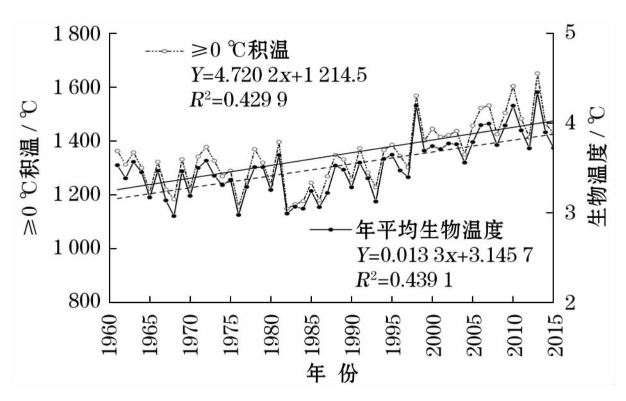


图 3 青海湖流域≥0 ℃积温及年平均生物温度变化特征

Fig. 3 Characteristic of the effective accumulated temperature greater than 0 ℃ and the annual biological temperature in Qinghai Lake Basin

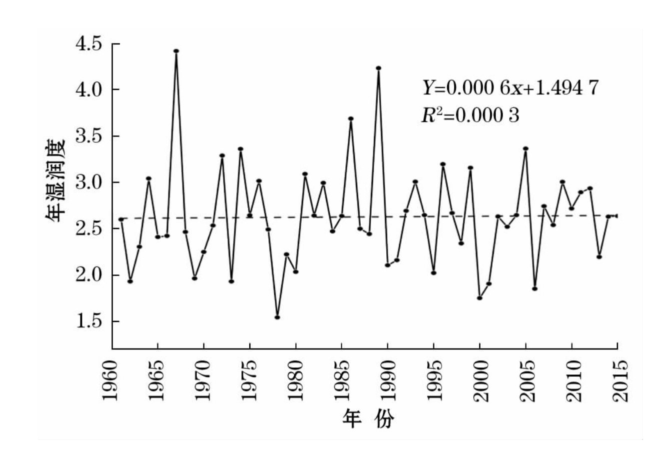


图 4 青海湖流域年湿润度变化趋势

Fig. 4 Change of the annual moisture humidity in Qinghai Lake Basin

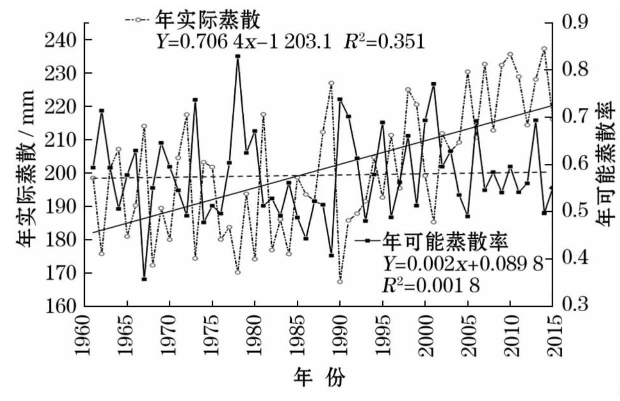


图 5 青海湖流域年可能蒸散率和年实际蒸散变化特征

Fig. 5 Variation of the annual potential evapotranspiration rate and actual evapotranspiration

一定的增加态势且湿润度极端值与降水量极端值出现年份同步，说明降水量对湿润度影响较大。

一般来说，针对青藏高原地区高寒草地，覆盖土地表面的植物群落相对比较矮小；因此，可将矮小植

物群落间的蒸腾量作为可能蒸散指标进行评价，而年可能蒸散和年降水量的比值作为年可能蒸散率来进行评价。青海湖流域年可能蒸散率波动较大，1978 年最高达 0.83；近 55 a 青海湖流域可能蒸散率呈现弱的波动增加态势，变化趋势也非常平缓（图 5）。

根据计算的 1961—2015 年青海湖流域年实际蒸散变化趋势可以看出（图 5），近 55 a 年实际蒸散呈明显的波动中增加的趋势（$P<0.01$），特别是 2001—2015 年增加的趋势显著且通过了 0.05 的显著性水平检验。不同阶段的最大年实际蒸散出现在 1967 年、1972 年、1989 年、1998 年和 2014 年，该地区年实际蒸散的极值年出现在 2014 年，达 237.32 mm。

2.2 流域净第一性生产力(*NPP*)

流域净第一性生产力（*NPP*）多年平均值为 2.86 t DM·hm^{-2}·a^{-1}（图 6），从多年变化趋势来看，1961 年以来，流域 *NPP* 呈现显著的波动增加趋势（$P<0.01$）。其中，1990 年 *NPP* 最低，仅为 2.31 t DM·hm^{-2}·a^{-1}；2014 年最高达 3.46 t DM·hm^{-2}·a^{-1}，比 1990 年高出 49.8%。从 1990 年开始，流域 *NPP* 增加的趋势为 0.28 t DM·hm^{-2}·$(10\ a)^{-1}$，明显高于 1961—1989 年的增加趋势 0.06 t DM·hm^{-2}。

2.3 青海湖水位及年径流量

总体上看，青海湖水位呈现显著的下降变化趋势（图 7），下降的速率达 −0.5 m·10 a^{-1}（$P<0.01$）；其中，湖水位在 1961 年最高达 3 196.1 m，2004 年最低仅为 3 192.9 m；从 2005 年开始湖水位发生转折进入增长阶段，2015 年又上涨至 3 194.4 m（图 9）。从 2004 年开始，湖水位连续上涨 11 a，每 10 a 平均抬升 14.4 cm（$P<0.01$）；2004—2015 年水位连续上涨，是监测以来水位连续抬升时间持续最长的一个阶段，且 2012 年水位抬升最大，相对上一年度上升 35.6 cm（图 7）。

入湖河流径流量也表现出弱的增加态势（图 8），增加的幅度为 5.94 m^3·s^{-1}·$(10\ a)^{-1}$；入湖河流年径流量以 2000 年为转折点，呈现下降和上升的两个阶段的变化特征；其中，1961—2000 年年径流量呈下降趋势但不显著，下降速率为 −13.5 m^3·s^{-1}·$(10\ a)^{-1}$；2001 年开始年径流量呈现弱的增加态势，增加的速率达 71.4 m^3·s^{-1}·$(10\ a)^{-1}$。受到降水量极端年份的影响，1989 年入湖河流年径流量达最大，2012 年次大，1973 年最低。从 2001—2015 年开始，流域降水量和年径流量变化均呈现出增加的态势，因此可以表明降水量的增加从而导致流域地表径流量增加，流入封闭湖泊中的水资源量增多，进而表现出湖水位连续上涨的变化趋势。

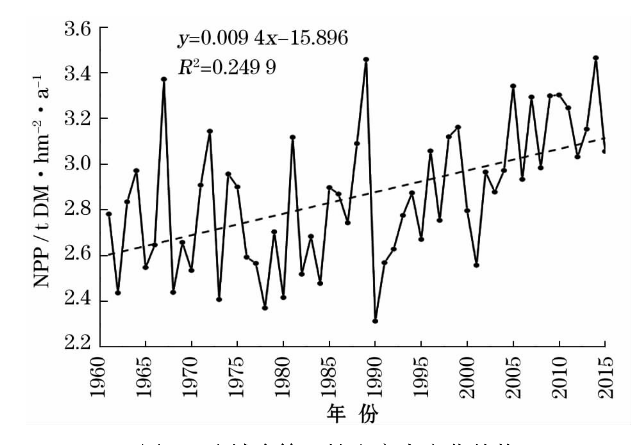


图 6 流域净第一性生产力变化趋势

Fig. 6 Change of the *NPP* in Qinghai Lake Basin

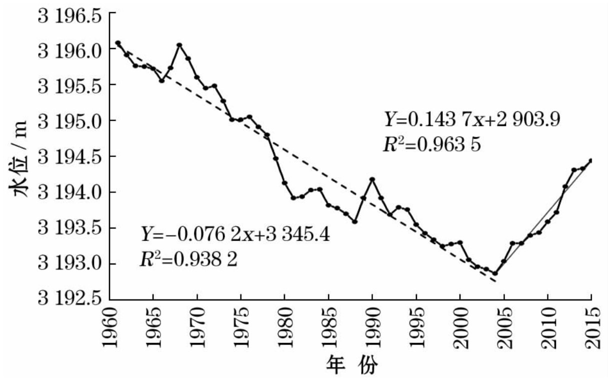


图 7 青海湖湖水位变化特征

Fig. 7 Lake water level variations between 1961 and 2015

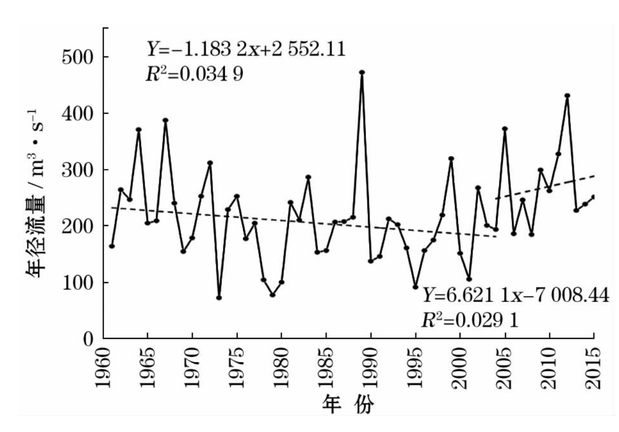


图 8 青海湖入湖河流径流变化特征

Fig. 8 Variation of river discharge flows into Qinghai Lake

2.4 湖水位变化影响因素分析

通过分析 1961—2015年青海湖湖水位与年降

表 1　水位与年降水量、年平均气温、≥ 0 ℃积温、年径流量、净第一性生产力(*NPP*)和年蒸发量之间的关系

Tab. 1　Correlation coefficients among water level, precipitation, air temperature, effective accumulated temperature greater than 0 ℃, discharge, *NPP* and evaporation

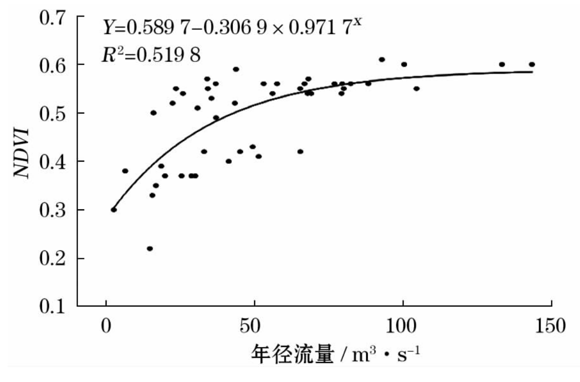
气候要素	水位	气候要素	水位
P	0.390 **	P_{i-1}	0.723 **
T	0.237 **	T_{i-1}	0.263
$\sum T$	0.186	$\sum T_{i-1}$	0.284 **
D	0.593 **	D_{i-1}	0.702 **
NPP	0.387 **	NPP_{i-1}	0.719 **
E	-0.400 **	E_i-1	-0.442 **

注: * 代表通过了 0.05 的显著性水平检验, * * 代表通过了 0.01 的显著性水平检验。其中, P、T、$\sum T$、D、NPP 和 E 分别代表当年的降水量、气温、≥0 ℃积温、流量、净第一性生产力和蒸发量, P_{i-1}、T_{i-1}、$\sum T_{i-1}$、D_{i-1}、NPP_{i-1} 和 E_{i-1} 分别代表各要素前一年的值。

水量、年平均气温、≥0 ℃积温、年径流量、净第一性生产力和年蒸发量之间的关系(表 1),发现不论前一年还是当年的降水量、径流量以及 *NPP* 均与湖水位呈显著正相关,而年蒸发量与水位呈现显著的负相关关系。从年平均气温和≥0 ℃积温与水位的关系结果中可以发现,无论当年还是前一年的气温还是≥0 ℃积温均与湖水位变化具有正相关关系,年平均气温仅在当年对湖水位产生影响,而前一年的≥0 ℃积温对湖水位的影响更显著。

此外,河流年径流量和植被生长状况之间也存在着一定的内在联系,从青海湖流域 *NPP* 和 *NDVI* 两种能反映植被生长状况的指标与年径流量之间的关系可以看出(图 9),入湖河流的年径流量与流域的 *NPP* 呈现显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数达 0.66,随着流域气候暖湿化导致流量的增加,流域内 *NPP* 也呈现增大的态势。此外,河流径流量与 *NDVI* 呈显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数达 0.72。前期,流域草地 *NDVI* 随着河流径流量增加开始快速增加;而当河流径流量增加到 75 $m^3 \cdot s^{-1}$后,*NDVI* 增长速度开始减缓而后变化幅度非常小基本保持平稳。

植被生长状况的优劣也可以直接影响到湖泊水位的变化(图 10),湖泊水位变化量与 *NPP* 和 *NDVI* 也存在着一定的联系,*NPP* 与水位差($\Delta H = H_{i+1} - H_i$, H_{i+1} 代表后一时段的平均水位, H_i 代表前一时段



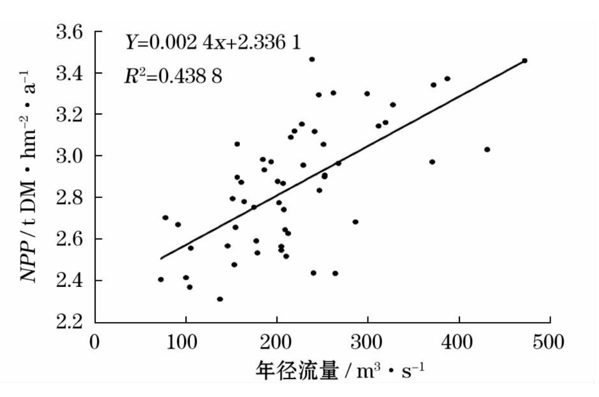
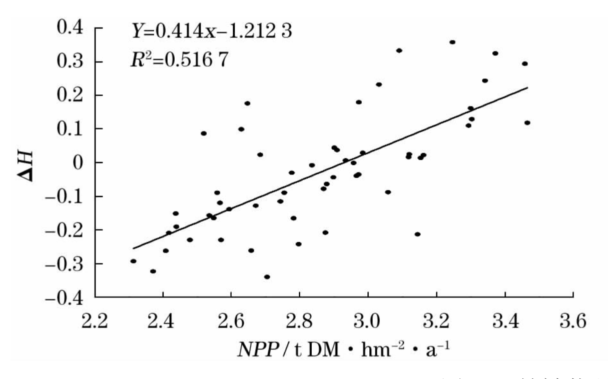


图 9　植被状况与径流量之间的关系

Fig. 9　Relationship between vegetation status and discharge



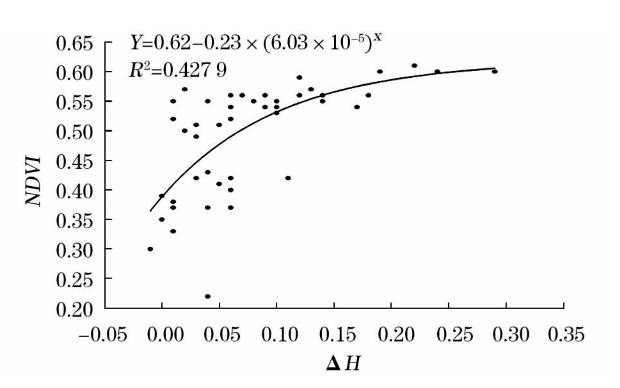


图 10　植被状况与水位之间的关系

Fig. 10　Relationship between vegetation status and water level

的平均水位)呈现显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数达0.72。湖泊水位的变化与*NDVI*也呈显著的正相关关系,相关系数达0.65。流域气候暖湿化使流域内冰雪融水增多、冻土融化最终导致河流径流量的增加,而气候暖湿化也使流域植被生长状况得到极大改善,流域草地*NPP*也表现出增大的态势。流域水土保持和水源涵养水平随着草地*NDVI*和*NPP*的增加逐渐得到提升,且草地生产力的提高对湖泊水文过程也具有正反馈效应。

通过上述研究和分析表明,1961—2015年以来青海湖流域年降水量呈弱的增加态势且从2001开始增加显著,同期流域升温趋势显著($P<0.01$)。总体上青海湖水位下降趋势显著,而从2004年开始呈现出连续上升的变化特征,连续上升11 a且在2012年水位抬升幅度最大。近55 a青海湖入湖河流年径流量呈现弱的增加态势,以2000年为界,之前入湖河流年径流量减少并不显著,之后呈增加态势。通过分析各要素与湖水位之间的关系,可以看出年降水量、年径流量以及*NPP*与湖水位呈显著正相关,而年蒸发量与水位呈现显著的负相关关系。年平均气温仅对当年的湖水位产生影响,而≥0 ℃积温对湖水位的影响在前一年更明显。河流年径流量和植被生长状况之间也存在着一定的内在联系,河流年径流量与流域*NPP*和*NDVI*呈现显著的正相关关系($P<0.01$),ΔH与流域*NPP*和*NDVI*也呈现显著的正相关关系。

3 结论

本研究通过对青海湖流域1961—2015年气温和降水量变化、径流量、气候因子(包括生物温度、≥0 ℃积温、可能蒸散和可能蒸散率、实际蒸散和湿润度)、净第一生产力和*NDVI*等指标的长时间序列分析,揭示了流域气候变化和植被生长状况对湖泊水位特征的影响,指出降水量、≥0 ℃积温、气温、径流量和*NPP*对湖泊水位变化具有正反馈效应,而蒸发量对湖泊水位变化具有负的反馈效应。对于青海湖水位的研究,伊万娟等[28]的研究发现,2004年之前水位呈现显著的下降趋势,之后又有所上涨,并指出流域内降水量的增多气温的增加这种趋于暖湿化的气候特征是湖泊水位回升的主要原因。范建华等[29]通过湖泊水量收支平衡的研究表明,青海湖水位的年际波动变化主要受到降水量变化的影响。李林等[30]、郭武[31]、李凤霞等[32]和舒卫先等[33]的研究也提出,流域降水量波动变化是导致青海湖水位和面积动态变化的主要原因。上述研究均从单因素分析或水量平衡方面进行了湖水位变化的归因分析,并没有结合径流量、降水量、蒸发量以及其他气候因子变化和*NPP*、*NDVI*等流域植被动态变化特征来进行详尽的分析和探讨,也并没有进行各要素前一年变化对湖泊水位变化的影响研究。本研究通过分析流域*NDVI*和*NPP*与径流量和水位变化的关系,可以从流域植被生长变化和水源涵养的角度研究和探讨高寒地区植被对流域水文过程的影响。而针对地处高原半干旱寒冷气候区的封闭湖泊青海湖而言,本研究通过分析各影响因素的前一年变化对湖泊水位的影响来阐述各因素在局地尺度的时滞性特征,这些分析思路和技术方法在今后的水文过程动态变化特征和水量平衡等定性定量的分析研究方面提供了可以借鉴的思路。此外,在研究水位变化的同时,不仅利用了水量平衡中的各个分量,还引入了生物温度、可能蒸散率、实际蒸散、湿润度以及表现植被生长状况的*NPP*和*NDVI*等来探讨气候和植被变化对湖泊水位的影响,在高原地区封闭湖泊的研究具有较强的适用性。

本研究通过结合气候因子、水文因子以及*NPP*和*NDVI*等表征植被生长状况的因子,分析探讨了青海湖水位变化的主要影响因素,得出以下结论:

(1)青海湖流域气温升高、降水量增加,流域气候呈显著的暖湿化变化特征,入湖河流径流量也呈现出弱的增加态势;气温增加和降水量升高导致流域生物温度增加,植被生长状况得到改善,*NPP*显著增加。

(2)前一年的降水量、≥0 ℃积温、温度、径流量、*NPP*和蒸发量对湖水位的影响更大;对湖水位的影响因素从大到小依次为降水量、径流量、*NPP*、蒸发量和≥0 ℃积温。

(3)降水量、≥0 ℃积温、温度、径流量和*NPP*对青海湖水位起到正反馈效应,而蒸发量对湖水位主要起负反馈效应。年降水量增多,河流径流量增大,湖水位抬升;年降水量和年径流量对湖水位有直接的正面影响,年降水量和年径流量是湖水位变化的最直接的影响因子。

(4)*NDVI*和*NPP*的增加反映流域植被生长状况得到好转,从而增加了流域植被水土保持和水源

涵养能力,对湖水位产生间接的影响。

本研究对于青海湖流域气候暖湿化、径流量增加、湖泊水位抬升、*NPP* 增加以及 *NDVI* 变化等特征的结论,有可能是短期或周期性的振荡变化特征的表现,并不能完全代表气候、植被和水位的长期甚至未来的变化态势。此外,由于本研究并未针对流域内生物量变化和地下水文过程以及该地区的季节性冻土和多年冻土冻融过程进行深入的分析和研究,研究结果可能存在一定的局限性。因此,今后应进一步综合植被、冻土以及气候变化等的多方面综合的长时间序列的数据资料进行更多技术方法应用、更多角度、更深层次的分析研究,以便获取更加准确和可靠的研究结果,为区域气候、生态和水文变化过程研究提供研究思路和技术方法。

参考文献(References)

[1] 赵宗慈,罗勇,王绍武,等. 全球变暖中的科学问题[J]. 气象与环境学报,2015,32(1):708 - 711. [ZHAO Zongci, LUO Yong, WANG Shaowu, et al. Scientific issues on global warming [J]. Journal of Meteorology and Environment,2015,32(1):708 - 711.]

[2] 杨永岐,陈鹏狮,吉奇. 气候变化对我国西北地区未来农业的影响及对策[J]. 辽宁气象,2001,17(4):12 - 15. [YANG Yongqi, CHEN Pengshi, JI Qi. Impacts and countermeasures of climate change on future agriculture in northwest in China[J]. Liaoning Meteorological Quarterly,2001,17(4):12 - 15.]

[3] 于秀晶,刘玉英,杜尧东,等. RCPs 情景下长白山区气候变化预估分析[J]. 气象与环境学报,2015,31(4):65 - 73. [YU Xiujing, LIU Yuying, DU Raodong, et al. Projection of climate change in Changbai Mountain under RCPs scenario[J]. Journal of Meteorology and Environment,2015,31(4):65 - 73.]

[4] 张新时,刘春迎. 全球变化与生态系统[M]. 上海:上海科学技术出版社,1994:62 - 95. [ZHANG Xinshi, LIU Chunying. Global change and ecosystem[M]. Shanghai: Shanghai science and Technology Press,1994:62 - 95.]

[5] 叶朝霞,陈亚宁,张淑花. 不同情景下干旱区尾闾湖泊生态水位与需水研究——以黑河下游东居延海为例[J]. 干旱区地理,2017,40(5):951 - 957. [YE Zhaoxia, CHEN Yaning, ZHANG Shuhua. et al. Ecological water level and water demand of the rump lake in arid land under different scenarios: A case of East Juyanhai at the downstream of Heihe River[J]. Arid Land Geography,2017,40(5):951 - 957]

[6] CUI B L, LI X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment,2015,527:26 - 37.

[7] AN Z, COLMAN S M, ZHOU W, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka[J]. Scientific Reports,2012,2: 619.

[8] LI X, LIU W. Water salinity and productivity recorded by ostracod assemblages and their carbon isotopes since the early Holocene at Lake Qinghai on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 407: 25 - 33.

[9] 李新虎,宋郁东,李岳坦,等. 湖泊最低生态水位计算方法研究[J]. 干旱区地理,2007,30(4):526 - 530. [LI Xinhu, SONG Yudong, LI Yuetan, et al. Calculation methods of lowest ecological water level of lake[J]. Arid Land Geography,2007,30(4):526 - 530.]

[10] LI X Y, XU H Y, SUN Y L, et al. Lake-level change and water balance analysis at Lake Qinghai, west China during recent decades [J]. Water Resources Management,2007,21(9):1505 - 1516.

[11] 李晓东,肖建设,李凤霞,等. 基于 EOS/MODIS 数据的近 10 a 青海湖遥感监测[J]. 自然资源学报,2012,27(11):1962 - 1970. [LI Xiaodong, XIAO Jianshe, LI Fengxia, et al. Remote sensing monitoring of the Qinghai Lake based on EOS/MODIS data in recent 10 years[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27 (11):1962 - 1970.]

[12] QIN B, HUANG Q. Evaluation of the climatic change impacts on the inland lake: A case study of Lake Qinghai, China[J]. Climatic Change,1998,39(4):695 - 714.

[13] ZHANG G, XIE H, DUAN S, et al. Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2011, 5 (1): 053532.

[14] LI X Y, MA Y J, XU H Y, et al. Impact of land use and land cover change on environmental degradation in Lake Qinghai watershed, northeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. Land Degradation and Development,2009,20(1):69 - 83.

[15] XU H, HOU Z, AN Z, et al. Major ion chemistry of waters in Lake Qinghai catchments, NE Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Quaternary International,2010,212(1):35 - 43.

[16] LIU X J U N, LAI Z, MADSEN D, et al. Last deglacial and Holocene lake level variations of Qinghai Lake, north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Quaternary Science,2015,30(3): 245 - 257.

[17] CUI B L, LI X Y. The impact of climate changes on water level of Qinghai Lake in China over the past 50 years[J]. Hydrology Research,2016,47(2):532 - 542.

[18] 沈芳,匡定波. 青海湖最近 25 年变化的遥感调查与研究[J]. 湖泊科学,2003,15(4):289 - 296. [SHEN Fang, KUANG Dingbo. Remote sensing investigation and survey of Qinghai Lake in the past 25 years[J]. Journal of Lake Science, 2003, 15 (4): 289 - 296.]

[19] 李凤霞,李林,沈芳,等. 青海湖湖岸形态变化及成因分析[J]. 资源科学,2004,26(1):38 - 44. [LI Fengxia, LI Lin, SHEN Fang, et al. Evolution of lakeshore shape of Qinghai Lake and its causes[J]. Resources Science,2004,26(1):38 - 44.]

[20] 殷青军,杨英莲. 基于 EOS/MODIS 数据的青海湖遥感监测[J]. 湖泊科学,2005,17(4):356－360. [YIN Qingjun,YANG Yinglian. Remote sensing monitoring of Lake Qinghai based on EOS/MODIS data[J]. Journal of Lake Science,2005,17(4):356－360.]

[21] 刘瑞霞,刘玉洁. 近 20 年青海湖湖水面积变化遥感[J]. 湖泊科学,2008,20(1):135－138. [LIU Ruixia,LIU Yujie. Area changes of Lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study[J]. Journal of Lake Science,2008,20(1):135－138.]

[22] 沈亚文,陈华,许崇育. 1973—2013 年青海湖水面面积变化遥感动态分析[J]. 水资源研究,2013,2(5):309－315. [SHEN Yawen,CHEN Hua,XU Chongyu. Remote sensing monitoring study for the tendency of Qinghai Lake's water area in last 41 years[J]. Water Resource Research,2013,2(5):309－315.]

[23] ZOTARELLI L,DUKES M D,ROMERO C C,et al. Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)[R]. Agricultural & Biological Engineering,2016.

[24] 张新时. 研究全球变化的植被—气候分类系统[J]. 第四纪研究,1993,(2):157－169. [ZHANG Xinshi. A vegetation-climate classification system for global change studies in China[J]. Quaternary Sciences,1993,(2):157－169.]

[25] 周广胜,张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报,1995,19(3):193－200. [ZHOU Guangsheng,ZHANG Xinshi. A natural vegetatiaon NPP model[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,1995,19(3):193－200.]

[26] 周广胜. 一个用气候－植被关系研究的区域蒸散模式,资源开发、全球变化与持续发展[M]. 北京:中国科学技术出版社,1995:570－573. [ZHOU Guangsheng. A regional evapotranspiration model based on climate vegetation relationships,resource development,global change and sustainable development[M]. Beijing: China Science and Technology Press,1995:570－573.]

[27] 任继周. 草地农业生态学[M]. 北京:中国农业出版社,1995. [REN Jizhou. Grassland agricultural ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press,1995.]

[28] 伊万娟,李小雁,崔步礼,等. 青海湖流域气候变化及其对湖水位的影响[J]. 干旱气象,2010,28(4):375－383. [YI Wanjuan,LI Xiaoyan,CUI Buli,et al. Climate change and impact on water level of the Qinghai Lake watershed[J]. Journal of Arid Meteorology,2010,28(4):375－383.]

[29] 范建华,施雅风. 气候变化对青海湖水情的影响——I. 近 30 年时期的分析[J]. 中国科学:化学,1992(5):537－542. [FAN Jianhua,SHI Yafeng,Impacts of climate change on the water regime in Qinghai Lake:I. In the past 30 years[J]. Scientia Sinica (Chimica),1992(5):537－542.]

[30] 李林,时兴合,申红艳,等. 1960—2009 年青海湖水位波动的气候成因探讨及其未来趋势预测[J]. 自然资源学报,2011,26(9):1566－1574. [LI Lin,SHI Xinghe,SHENG Hongyan,et al. Cause water level fluctuation in Qinghai Lake from 1960 to 2009 and its future trend forecasting[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(9):1566－1574.]

[31] 郭武. 青海湖水位下降与湖区生态环境演变研究[J]. 干旱区资源与环境,1997,(2):76－81. [GUO Wu. Studies on change in stage and evolution of ecological environment for the Qinghai Lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,1997,(2):76－81.]

[32] 李凤霞,伏洋,杨琼,等. 环青海湖地区气候变化及其环境效应[J]. 资源科学,2008,30(3):348－354. [LI Fengxia,FU Yang,YANG Qiong. Climate change and its environmental effects in the surrounding area of Qinghai Lake[J]. Resources Science,2008,30(3):348－354.]

[33] 舒卫先,李世杰,刘吉峰. 青海湖水量变化模拟及原因分析[J]. 干旱区地理,2008,31(2):229－236. [SHU Weixian,LI Shijie,LIU Jifeng. Simulation of water change in Qinghai Lake and affecting factors[J]. Arid Land Geography,2008,31(2):229－236.]

Influence of watershed hydrothermal conditions and vegetation status on lake level of Qinghai Lake

LI Xiao-dong[1,2,3], ZHAO Hui-fang[2,3], WANG Guan-xin[1], YAO Kai-rong[4], XIN Qiong[5], HE Zhuo-lun[6], LI Lin[1,2,3]

(1 *College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*;
2 *Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining* 810001, *Qinghai, China*;
3 *Qinghai Provincial Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction, Xining* 810001, *Qinghai, China*;
4 *Xishui Prefectural Meteorological Bureau, Guizhou Province, Xishui* 564600, *Guizhou, China*;
5 *Guide Prefectural Meteorological Bureau, Qinghai Province, Guide* 811700, *Qinghai, China*;
6 *Hydrology and Water Resources Bureau of Qinghai Province, Xining* 810001, *Qinghai, China*)

Abstract: As an important part of land water resource, lake is an important indicator of local climate and global environment change. The increase of lake area and change in the lake's water level directly reflect the process of water balance change in its basin, which is sensitive to regional and global climate change. Qinghai Lake is the largest saline lake in China, with 3 190 m asl in the arid-semiarid area of the Qinghai-Tibet Plateau. The lake has experienced decline in water level and lake area over the past 50 years, but it has rebounded over the latest 10 years. This study investigated lake hydrology, climate change and hydrothermal and vegetation growth conditions in the basin, focusing on the causes for water level variation. To reveal hydrology, meteorology and vegetation change, linear trend method was used to analyze long-term data in this study. The Pearson correlation coefficient method was used to calculate relationship between various factors and the lake water level to quantitatively evaluate the lake water level change effected by regional meteorological, hydrological, and vegetation factors. The results showed that the basin climate had a significant warming and wetting trend, and the total precipitation had a weak increase trend with a climatic tendency rate of 10.8 mm·$(10\ a)^{-1}$. The annual evapotranspiration rate and annual actual evapotranspiration fluctuated greatly in the basin. Average net primary productivity (*NPP*) of the basin was 2.86 t DM·hm^{-2}·a^{-1}, showing a significant increase trend ($P<0.01$). The water level was dropped during the period from 1961 to 2003, and was significantly increased from 2004 to 2015 with an increasing rate of 14.4 m·$(10\ a)^{-1}$ ($P<0.01$). The trend of warming and wetting of the climate was intensified and the runoff into the lake got increased, resulting in a significant rise in water level. The vegetation growth is improved and *NPP* is significantly increased. The amount of precipitation, the accumulated temperature (above 0 degree Celsius), annual air temperature, runoff, *NPP* and evaporation in the year before had even bigger impact on the lake's water level in current year. The increase of the *NDVI* and *NPP* reflected the improvement of the vegetation growth in the basin which in return enhanced the capability of the basin in the conservation of water and soil, indirectly impacting the lake's water level. The precipitation, the accumulated temperature (above 0 degree Celsius), air temperature, runoff and *NPP* had a positive feedback effect on the lake's water level, while evaporation has a negative feedback effect on the lake's water level. The annual precipitation and runoff were the most direct factors of the water level changes.

Key words: Qinghai Lake watershed; climate change; hydrothermal conditions; vegetation status; lake level